JAEA-Testing
2013-003

# ドップラーライダの長期実用性に関する調査

## ―欠測率と風車型風向風速計データとの比較―

Examination on the Long-term Practicability of a Doppler Lidar
-Data Missing Rate and Comparison of Wind Direction
and Speed with the Propeller Type-

中野 政尚　渡辺 均　住谷 秀一

Masanao NAKANO, Hitoshi WATANABE and Shuichi SUMIYA

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
放射線管理部

Radiation Protection Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

November 2013

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

# ドップラーライダの長期実用性に関する調査
## ―欠測率と風車型風向風速計データとの比較―

日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所　放射線管理部
中野　政尚、渡辺　均、住谷　秀一

（2013 年 7 月 8 日受理）

近年、ドップラーライダは気象観測におけるリモートセンシング技術の発達とともに、市販されるようになった。それに伴い、種々の試験機関によってその手法及び適用について検討試験等がなされ、概ね良好な結果が報告されている。しかしながら、ほとんどの検討試験は、短期間に限定されており、原子力発電所等における長期間の気象観測に適用できるかどうかは不明であった。

そのため、ドップラーライダ（Leosphere 社製 Windcube WLS7）について、その性能及び実用性を長期間にわたって検討評価することを目的として、日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所の気象観測鉄塔に設置した風車型風向風速計との比較測定を 1 年間行い、気象指針で要求される基本性能（年間欠測率 10%以下、連続 30 日欠測率 30%以下）を確認するとともに、風車型風向風速計で取得した風向風速データと比較し、同等の結果が取得できるかどうかを調査した。

その結果、地上高 180m以下においては、気象指針で要求される欠測性能を満たすとともに、地上高 68m（海抜 100m）における比較測定結果における風向･風速の相関も良好であることから、本試験で使用したドップラーライダは、原子力施設からの一般公衆の線量評価を目的にした気象観測装置として、実用性のある装置であると考えられる。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松 4-33

JAEA-Testing 2013-003

# Examination on the Long-term Practicability of a Doppler Lidar
## —Data Missing Rate and Comparison of Wind Direction and Speed with the Propeller Type—

Masanao NAKANO, Hitoshi WATANABE and Shuichi SUMIYA

Radiation Protection Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 8, 2013)

Since the remote sensing technique for the meteorological observation has been developing these years, the Doppler Lidar is available in the commercial market. Although some investigation organizations carried out the examination on the method and application of Doppler Lidars and had generally good results, the duration of the examination was limited in a short period. So it is unknown whether the Doppler Lidar is applicable to the long-term meteorological observation in the nuclear facilities to assess the public dose around nuclear facilities.

In order to examine the long-term performance requested by the Japanese guideline for meteorological observation (i.e., the annual and the sequential 30-days missing rate should be less than 10% and 30%, respectively.) and the consistency with the data measured by conventional type, the wind direction and speed was measured by the Doppler Lidar (Windcube WLS7 made by Leosphere Co. Ltd.) for one year, and then compared with those measured by the propeller type anemometer installed at the top of the meteorological observation tower.

As a result, the missing rate of the Doppler Lidar was satisfied with the guideline at the height less than 180m, and the data at 68m above the ground level (100m above sea level) had a good relationship with the propeller data. From this fact, the Doppler Lidar used in this examination is considered to have a practicability for the dose assessment of the public.

Keywords: Meteorological Observation, Doppler Lidar, Wind Direction, Wind Speed, Japanese Guideline

# 目　　次

1.　緒言 ........................................................................................................................1
2.　ドップラーライダ ......................................................................................................2
　2.1　ドップラーライダの原理 ..........................................................................................2
　2.2　使用したドップラーライダ ......................................................................................3
　2.3　観測パラメータ ........................................................................................................5
3.　比較観測方法 ..............................................................................................................7
　3.1　観測地点 ....................................................................................................................7
　3.2　その他関連取得データ ............................................................................................8
4.　観測結果 ....................................................................................................................10
　4.1　ドップラーライダ観測データの人為的欠測率 ....................................................10
　4.2　ドップラーライダ観測データの自然欠測率 ........................................................10
　4.3　ドップラーライダと気象観測鉄塔との相関 ........................................................12
　4.4　観測値の差の出現状況 ..........................................................................................18
　4.5　荒天時の観測状況 ..................................................................................................19
5.　考察 ............................................................................................................................22
　5.1　降雨との関係 ..........................................................................................................22
　5.2　濃霧との関係 ..........................................................................................................22
　5.3　エアロゾルとの関係 ..............................................................................................24
　5.4　その他注警報時の欠測率 ......................................................................................26
6.　結言 ............................................................................................................................27

付録 1：ドップラーライダ設置方法の詳細 ...................................................................28
付録 2：設置方角確認作業の詳細 ...................................................................................29

# CONTENTS

1. Introduction ........................................................................................................................1
2. Doppler Lidar ........................................................................................................................2
   2.1 Principle of Doppler Lidar........................................................................................2
   2.2 Doppler Lidar examined............................................................................................3
   2.3 Parameters for observation .......................................................................................5
3. Method of observation and comparison.............................................................................7
   3.1 Observation point .......................................................................................................7
   3.2 Related data obtained .................................................................................................8
4. Result....................................................................................................................................10
   4.1 Artificial missing rate of observation .....................................................................10
   4.2 Natural missing rate of observation........................................................................10
   4.3 Data correlation between Lidar and meteorological tower.....................................12
   4.4 Difference between the two observed data..............................................................18
   4.5 Observation at stormy weather ................................................................................19
5. Discussion............................................................................................................................22
   5.1 Relation with rainfall................................................................................................22
   5.2 Relation with dense fog............................................................................................22
   5.3 Relation with aerosol................................................................................................24
   5.4 Missing rate with the other warnings .....................................................................26
6. Conclusion...........................................................................................................................27

Appendix 1: The details of the installation configuration
of the Doppler Lidar .............................................28
Appendix 2: The details of the confirmation of the setting direction...................................................29

# １．緒言

現在、原子力発電所等における気象観測は、発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針（以下、気象指針）に基づいて行われている。気象指針においては、風向風速は、(1)風車型風向風速計(プロペラ型発電式)、(2)風杯型風速計(三杯式)及び矢羽根型風向計、(3)超音波風向風速計、(4)ドップラーソーダ（平成 6 年改訂以降)、のいずれかを用いて行うこととされている。

一方で近年においては、ドップラーライダはリモートセンシング技術の発達とともに、市販されるようになった。それに伴い、種々の試験機関によってその手法及び適用について検討試験等がなされ、概ね良好な結果が報告されている。しかしながら、ほとんどの検討試験は、短期間に限定されており、原子力発電所等における長期間の気象観測に適用できるかどうかは不明であった。

そのため、ドップラーライダについて、その性能及び実用性を長期間にわたって検討評価することを目的として、（独）日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所（以下、サイクル工学研究所と記す。）の気象観測鉄塔（以下、鉄塔と記す。）に設置した風車型風向風速計との比較測定を 1 年間行い、気象指針で要求される基本性能（年間欠測率 10%以下、連続 30 日欠測率 30%以下）を確認するとともに、風車型風向風速計で取得した風向風速データと比較し、同等の結果が取得できるかどうかを検討した。

# ２．ドップラーライダ

## 2.1　ドップラーライダの原理

ライダ(LIDAR)とは、Light Detection And Ranging の略で、光を用いたリモートセンシング技術である。パルス状に発光するレーザ照射に反射する散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離やその対象の性質を分析するために利用される。その中でもドップラーライダは、物質の同定や量を測定するのではなく、測定対象の移動速度を計測する。大気中のエアロゾルがある速度で移動しているとき、エアロゾルによって反射された光の周波数は発射された光の周波数とは異なる（ドップラー効果)。この周波数差から大気によって運ばれるエアロゾルの移動方向、移動速度がわかり、これを大気の風向風速とみなす。

一方で、この測定原理から、エアロゾルが大気中に十分存在しない場合、反射光が少なくなる。逆に濃霧時などには反射光が到達しないことがあり、その場合は測定ができないことになる。

ドップラーライダによる風速観測値は、ライダに対する視線方向の 1 次元的な速度情報であるため、観測対象（エアロゾル）の遠ざかる速度あるいは近づいてくる速度のみしか取得できない（図 2.1)。そこで、レーザ照射の送信方向を東西南北 4 方向に変化させ、同一地上高のドップラー速度を円周状に集め、その円周内においては一定の風が吹いていると仮定することにより、その風速場の平均風速、平均風向を求めている。

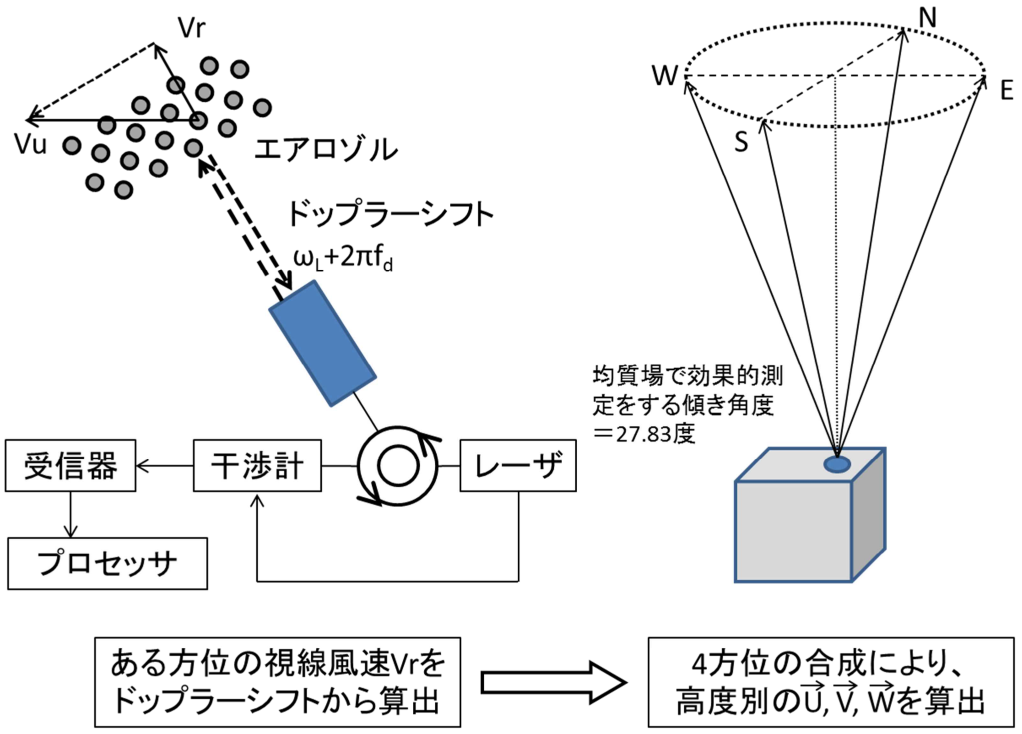



図 2.1　ドップラーライダの計測原理

## 2.2　使用したドップラーライダ

今回の観測で使用したドップラーライダ（フランス Leosphere 社製の Windcube™ WLS7；日本総代理店　英弘精機株式会社）の外観写真を図 2.2 に示す。WLS7 は光学ヘッド（送信と受信の光学系）、電子装置（レーザ光源から検出器までの光電子要素）、コンピュータ（データ収集、信号処理、およびデータ保存用）で構成されている（図 2.3）。表 2.1 に取扱説明書より抜粋した WINDCUBE™ の性能と仕様を示す。

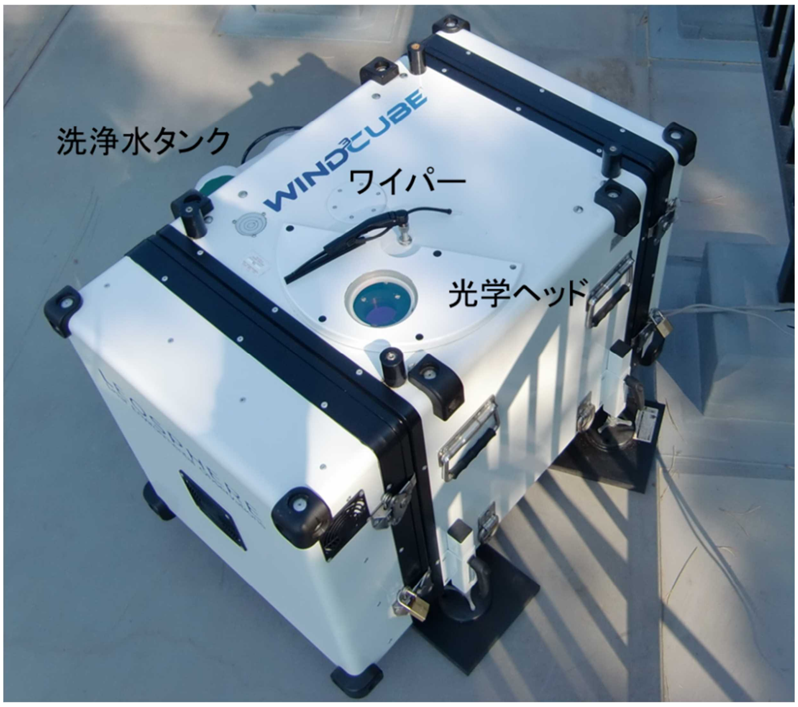



図 2.2　　WLS7 外観写真

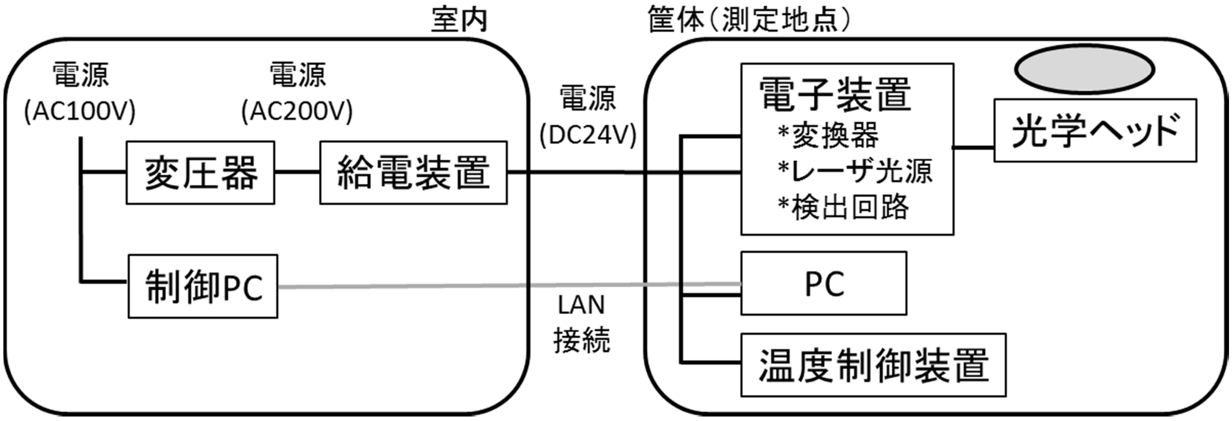



図 2.3 WINDCUBE™ のブロックダイヤグラム

表 2.1　WINDCUBE™ の性能と仕様（取扱説明書より抜粋）

| | |
|---|---|
| 性能 | |
| 計測地上高範囲 | 40～200 m(大気の状態に依存) |
| 積分時間 | 0.5 秒 |
| データ出力間隔 | 1 秒 |
| 計測高度数 | 10 高度 |
| 最短高度間隔 | 20 m |
| 高度分解能 | 1m |
| 円錐走査角 | 14～15 度または 27～28 度 |
| 風速範囲 | 0～60m/s(大気の状態に依存) |
| 風速精度 | 0.2 m/s |
| 水平風向範囲 | 0～360 度 |
| 水平風向精度 | 1.5 度 |
| データ取得率 | (計測地上高)150m 以下で 95%超 |
| レーザ | |
| 波長 | 1.54 μm |
| パルスエネルギー | 10 μJ |
| 目の安全性 | IEC60825－1 |
| 環境 | |
| 温度範囲 | 温度制御装置付きで(表示温度)－15～40 ℃ |
| 使用環境湿度 | IP65 |
| 雨滴保護 | (洗浄液ポンプ付き)自動ワイパ |
| 可搬性 | 可搬型(2 名) |
| 寸法と重量 | |
| 寸法 | WINDCUBE™ 本体: (遮光板非装着状態)900×550×H550 mm<br>(遮光板装着状態) 940×740×H640 mm<br>空輸箱 : 1,070×770×H880 mm<br>電源装置 : 360×200×H150 mm |
| 重量 | WINDCUBE™ 本体: 60 kg (空輸箱含む場合: 130kg)<br>給電装置 : 4 kg<br>変圧器 : 2.2 kg |
| 電源仕様 | |
| 電源 | DC27V(AC100～240V 用電源装置および AC100V 用変圧器付き) |
| 消費電力 | 温度制御装置付きで 375 W |

設置にあたっては、航空写真から大まかな北方位を決定して設置した。その後、太陽の南中時刻に測定した鉛直軸の影の方位から北からのずれ角を決定し、データ解析段階で補正した。なお、ずれ角は 2 度であった。

## 2.3　観測パラメータ

本試験に用いたドップラーライダ装置の観測パラメータは以下の通りである。

a.偏角

本ドップラーライダ装置の固有の偏角（deviation angle）は 27.83 度である。

b. パラメータ

図 2.4 に機器停止後に取得した観測パラメータ設定（Configuration）画面のスクリーンショットを示す。CNR threshold*は「－21（メーカ推奨値）」で設定。24 時間に 1 ファイル出力としている。

* CNR threshold(キャリアノイズ比閾値): CNR はキャリアノイズ比を意味し、計測品質の診断値であり、信号ノイズ比と同じである。CNR 値未満の場合に、WINDCUBE$^{TM}$ が計測値を自動的に除去するように、CNR threshold(キャリアノイズ比閾値)を定義する。

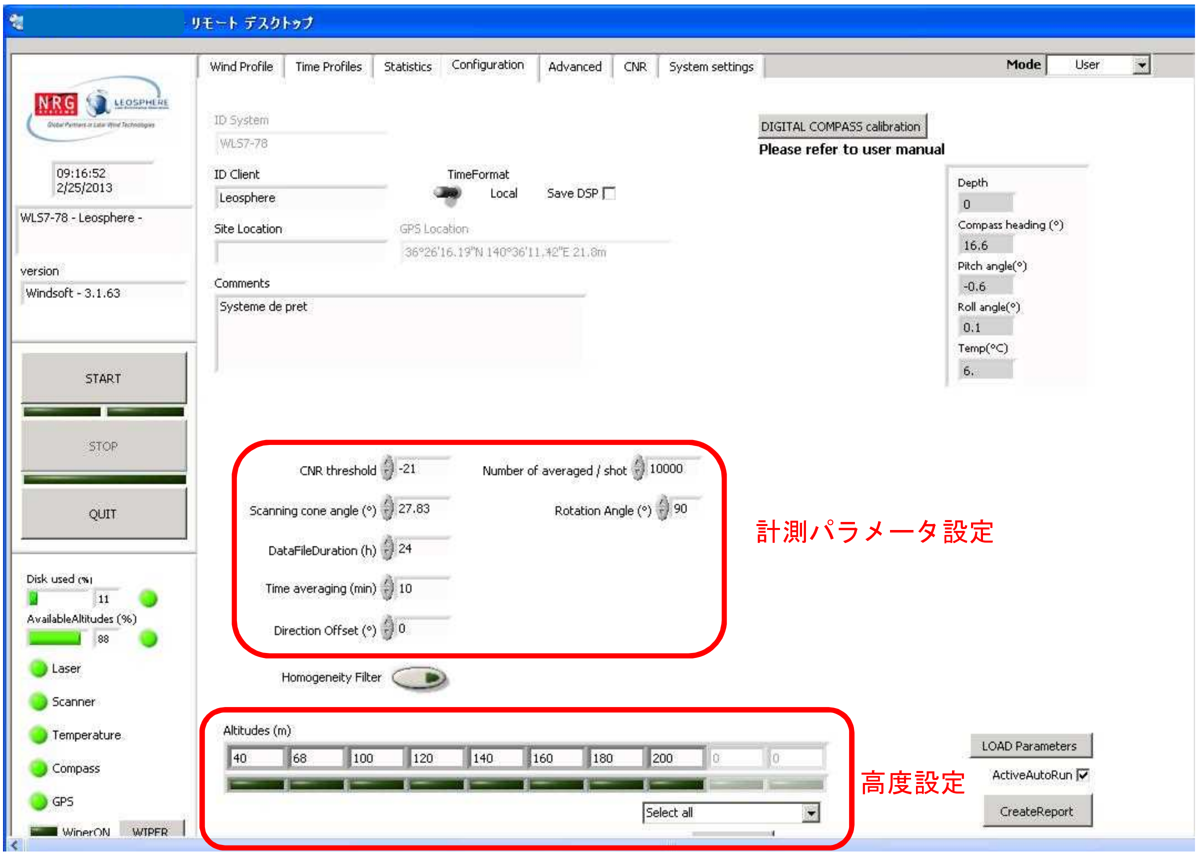



図 2.4　観測パラメータ設定（Configuration）画面

注：右上（コンパス）の測定値については、建家屋上設置のため、正確ではない。

c. 観測地上高の設定

鉄塔に取り付けた風車型風向風速計（海抜 100m）で取得したデータと比較するため、ドップラーライダを設置した標高 32m を考慮して、地上高 68m を観測高度として設定した。その他、各地上高での欠測率把握のため、一般的な設定地上高である 40～200m の範囲内で、高度分解能が 20m であることから、概ね 20m 間隔で設定した。その結果、観測地上高は 40m, 68m, 100m, 120m, 140m, 160m, 180m, 200m の 8 高度とした。WINDCUBE の Wind Profile 画面を図 2.5 に示す。

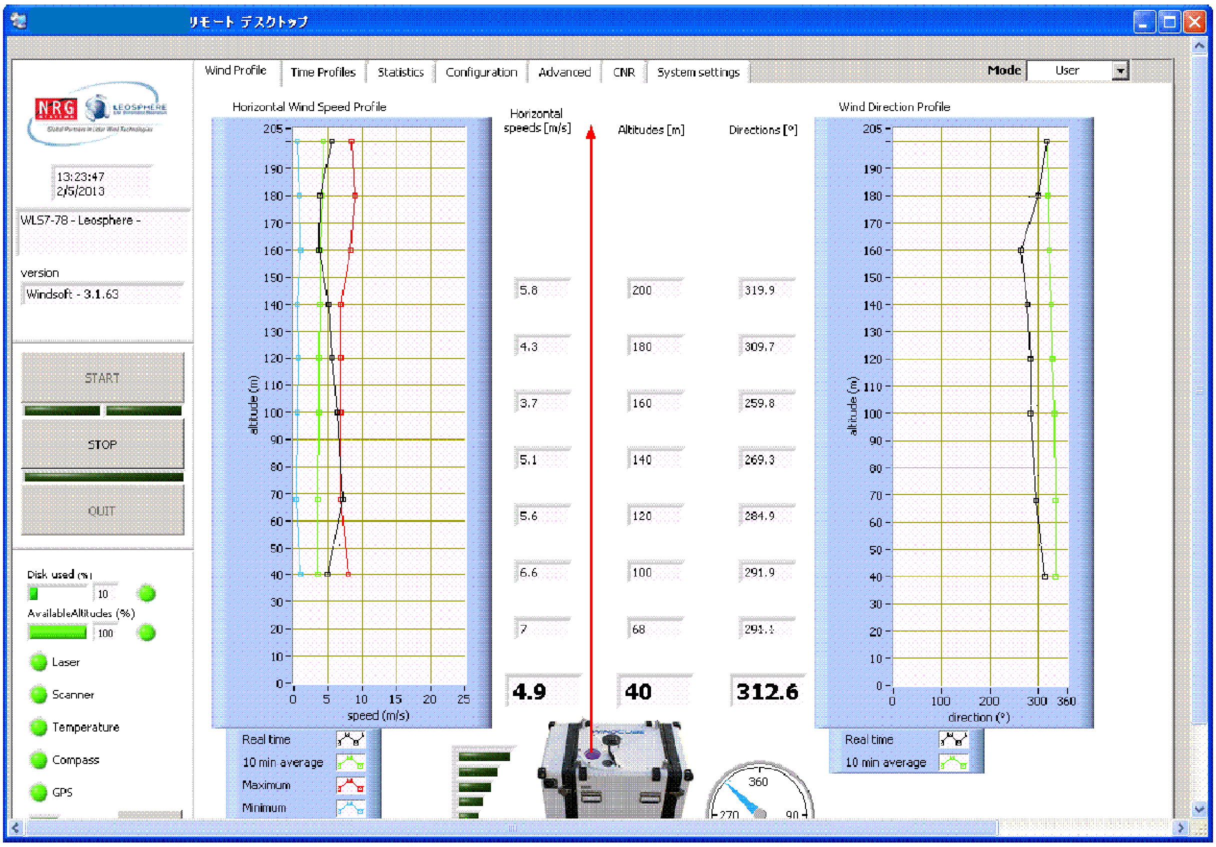



図 2.5　WINDCUBE の Wind Profile 画面

# ３．比較観測方法

## 3.1　観測地点

観測は平成 24 年 2 月 1 日から 1 年間、サイクル工学研究所構内（茨城県那珂郡東海村村松 4－33；図 3.1）において実施した。

天頂角で 30 度方向の見渡しが良好な場所であり、比較的鉄塔に近い、サイクル工学研究所構内のリサイクル機器試験施設(RETF)工事監理棟屋上（標高 32m）にドップラーライダを設置し、地上高 40～200m の風向風速を観測した。そのうち、地上高 68m（海抜 100m）データと、約 70m 離れた鉄塔で観測された海抜 100m データ（風車型微風向風速計；光進電気社製 MVS－300（発信機）、MVS－320（10 分間平均装置付記録計）；気象庁検定済）との毎 10 分間平均データの比較を行った（図 3.2、図 3.3）。

測定は 1 年間を通じて、可能な限り、中断することなく実施したが、サイクル工学研究所内の電気設備点検のための計画停電や本装置のメンテナンス等による人為的欠測が生じる場合があった。

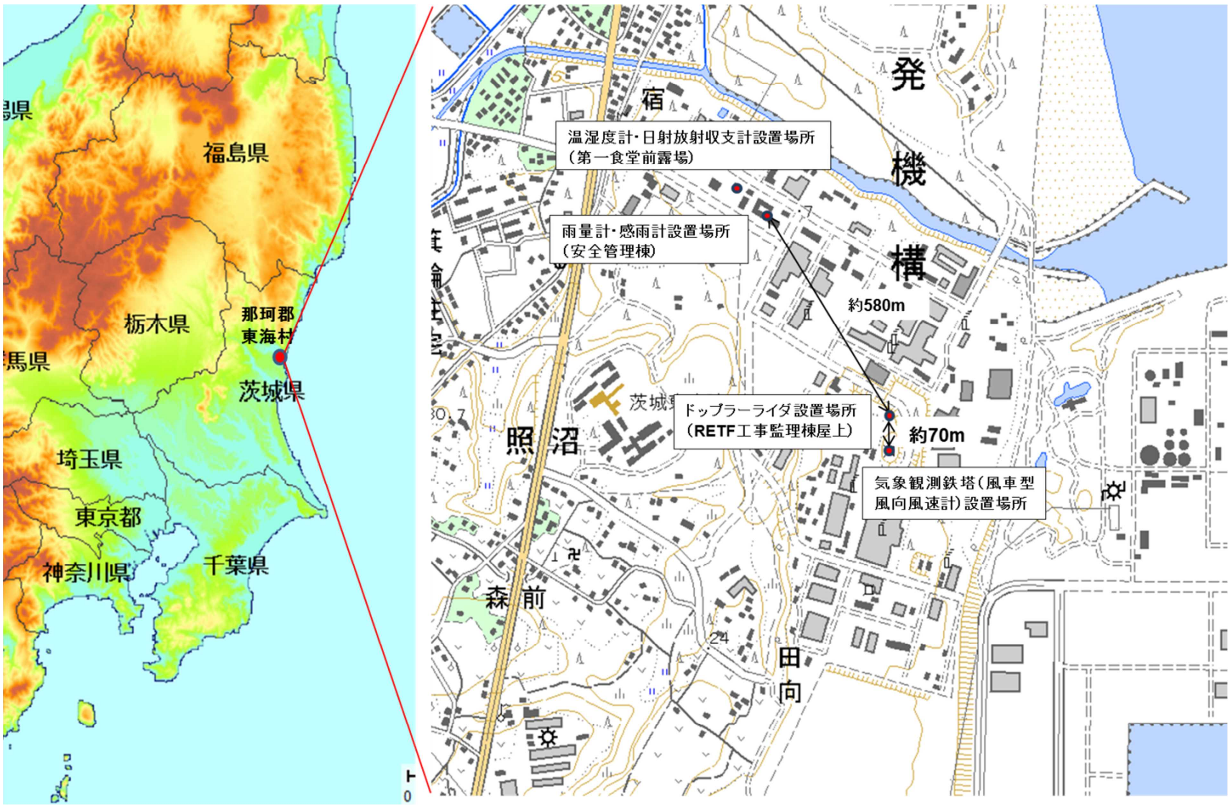



図 3.1　ドップラーライダ装置設置場所（地図出典：電子国土）

図 3.2　RETF 工事監理棟屋上に設置したドップラーライダ（左）と気象観測鉄塔（右）

図 3.3　風車型微風向風速計（気象観測鉄塔塔頂）

3.2　その他関連取得データ

(1) 降水量、感雨データ

ドップラーライダに対する降雨の影響を見るため、サイクル工学研究所構内（安全管理棟屋上）において、小笠原計器製 0.1mm 雨量計 RS－511 により観測した降水量（0.1mm 計）及び光進電気製感雨計 TRW－010 により観測した感雨信号を読み取った（図 3.4）。

(2) 絶対湿度データ

大気中水蒸気量（エアロゾル量に関係）の把握のために、サイクル工学研究所構内（第一食堂前露場）において、小笠原計器製温湿度計 JS－155（気象庁検定済（図 3.5））により観測した 10 分毎の相対湿度及び大気温度から、絶対湿度算出式を用いて算出した。

(3) 日射放射収支量

大気の状態の把握のため、サイクル工学研究所構内（第一食堂前露場）において、英弘精機製日射計 MS401（気象庁検定済）及び放射収支計 MF－11（日本気象協会キャリブレーション済）により観測した 10 分毎の日射放射収支量を読み取った（図 3.5）。

(4) 東海村に発出された濃霧注意報等

濃霧注意報が発出されたことが必ずしも濃霧状態である訳ではないが、濃霧による影響把握のために東海村に発出された濃霧注意報を整理し、欠測との関連の考察を深める上で利用した。また、同様に大雨（大雪）注意報（警報）、雷注意報、強風注意報（暴風警報）についても整理した。東海村への注警報実績については、水戸地方気象台発行「茨城県の気象・地震概況」（http://www.jma-net.go.jp/mito/gaikyo/からダウンロード）から抽出した。

図 3.4　降水量（0.1mm 計）及び感雨計

図 3.5　温湿度計、日射計及び放射収支計

# ４．観測結果

## 4.1　ドップラーライダ観測データの人為的欠測率

本測定期間（平成 24 年 2 月 1 日午前 9 時～平成 25 年 2 月 1 日午前 9 時；データ数 52,704 個（＝6（個/h）×24（h/日）×366（日/年））においては、極力人為的欠測が生じないよう努力した。しかしながら、計画停電等の理由により、1 年間で 10 回（計 494 データ）の人為的欠測が生じた。表 4.1 に欠測時刻、理由を示す。

表 4.1　人為的欠測一覧

| 番号 | 欠測時間帯 | 10 分値欠測数 | 理由 |
|---|---|---|---|
| 1 | H24/2/14 9:50～13:30 | 23 | メンテナンス |
| 2 | H24/2/22 12:00～14:50 | 18 | 電源誤切断 |
| 3 | H24/3/16 14:20 | 1 | メンテナンス |
| 4 | H24/4/25 10:00 | 1 | メンテナンス |
| 5 | H24/6/26 13:30 | 1 | メンテナンス |
| 6 | H24/7/17 14:10～15:30 | 9 | 停電 |
| 7 | H24/9/26 13:30 | 1 | 時刻調整 |
| 8 | H24/11/6 16:10～11/9 16:30 | 435 | 計画停電 |
| 9 | H24/12/13 13:20～13:50 | 4 | 建屋メガ測定 |
| 10 | H25/1/18 15:00 | 1 | メンテナンス |
| 合計 | | 494 | |

## 4.2　ドップラーライダ観測データの自然欠測率

人為的欠測 494 データを除外した 1 年間のデータ数 52,210 個（＝52,704－494）のうち、気象条件などに起因する 40～200m の各地上高における自然欠測数を整理した。

### a.　年間欠測率、月間欠測率

表 4.2 に各地上高における欠測数と割合を示す。年間欠測率は 1.7%（地上高 100m）から 10.7%（地上高 200m）の間であった。気象指針によれば、年間欠測率は 10%以内としているので、地上高 180m までは、ドップラーライダが適用可能である。また、夏季よりも冬季に多く欠測が生じる傾向にあり、月間欠測率は 0～30%の間であった。各地上高ともに、12 月の欠測率が最も大きかった。

表 4.2　各地上高における欠測数と欠測率

| 年月 | ﾃﾞｰﾀ数 | 40m | 68m | 100m | 120m | 140m | 160m | 180m | 200m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H24.2 | 4,135 | 34 | 35 | 25 | 20 | 47 | 93 | 159 | 275 |
| H24.3 | 4,463 | 34 | 18 | 13 | 27 | 42 | 67 | 107 | 174 |
| H24.4 | 4,319 | 19 | 13 | 16 | 22 | 51 | 119 | 194 | 273 |
| H24.5 | 4,464 | 5 | 0 | 23 | 54 | 89 | 137 | 212 | 310 |
| H24.6 | 4,319 | 0 | 0 | 34 | 111 | 176 | 233 | 325 | 463 |
| H24.7 | 4,455 | 0 | 0 | 14 | 60 | 148 | 240 | 352 | 486 |
| H24.8 | 4,464 | 0 | 0 | 2 | 9 | 32 | 55 | 80 | 126 |
| H24.9 | 4,319 | 0 | 0 | 11 | 17 | 39 | 78 | 158 | 330 |
| H24.10 | 4,464 | 1 | 1 | 0 | 0 | 6 | 18 | 46 | 106 |
| H24.11 | 3,885 | 131 | 71 | 29 | 34 | 82 | 188 | 338 | 544 |
| H24.12 | 4,460 | 496 | 502 | 439 | 448 | 574 | 771 | 1,007 | 1,361 |
| H25.1 | 4,463 | 462 | 365 | 298 | 270 | 357 | 507 | 752 | 1,137 |
| 合計 | 52,210 | 1,182 | 1,005 | 904 | 1,072 | 1,643 | 2,506 | 3,730 | 5,585 |
| 年間欠測率 | | 2.3% | 1.9% | 1.7% | 2.1% | 3.1% | 4.8% | 7.1% | 10.7% |
| 月間最小欠測率 | | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 0.4% | 1.0% | 2.4% |
| 月間最大欠測率 | | 11.1% | 11.3% | 9.8% | 10.0% | 12.9% | 17.3% | 22.6% | 30.5% |

b. 連続 30 日欠測率

連続 30 日欠測率については、月間最大欠測率が最も大きかった 12 月期を少しでも含む期間を対象に算出した（図 4.1）。気象指針によれば、連続 30 日欠測率は 30%以下であるとしているが、地上高 180m 以下でこの基準を満たしていた。連続 30 日欠測率は、年間欠測率同様に地上高の低下とともに減少するが、地上高 100～120m で極小になり、地上高 40～68m では逆に上昇した。連続 30 日欠測率は、平成 24 年 12 月 6 日からの 30 日間において最大となり、地上高 40～68m において 15～16%に達した。

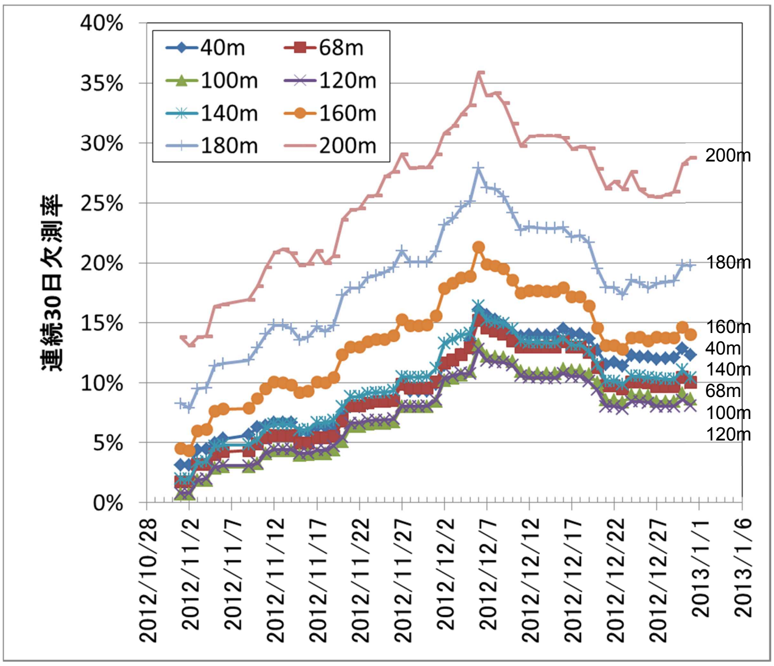



図 4.1　連続 30 日欠測率の推移

### 4.3　ドップラーライダと気象観測鉄塔との相関

#### a.　風向風速の相関

鉄塔とドップラーライダの風向風速に関する相関関係は、風向風速ともに海抜 100m（地上 68m）のデータを用いて検討した。地上 68m のドップラーライダ有効データは 51,205 個（＝52,210－1,005）であるが、その期間内における鉄塔側の欠測（年次点検によるもの）が 13 件あるため、比較できるデータは 51,192 個である。

風向については、鉄塔での静穏(calm)時データ（192 件）を除外した 51,000 データについて、16 方位の風向頻度の相関散布表を用いて、当該風向±1 方位以内に含まれる風向頻度から風向一致率を求めた。

風速については、鉄塔の静穏時（192 件）及び 20m/s 超の風速（36 件）を除外した 50,964 データについて、全風向及び各風向において、それぞれの一次回帰式による回帰係数と相関係数を求め、これらの相関散布図の作成は全風向及び風向別（鉄塔を基準とした 16 方位）に示した。

これら相関関係のデータ一覧表を表 4.3（風向）、表 4.4（風速）に示し、相関散布図を図 4.2（全方位）、図 4.3（方位別）に示す。

(a)  風向の相関

風向の一致率（風向差±1 方位以内）は、各方位において 98.7～99.9%、全体で 99.6%にあり、高い一致率を示した。風配図を図 4.4 に示す。

(b)  風速の相関

風速の相関係数は、全風向では $R^2$＝0.98 となっており、高い相関となっている。回帰式においては勾配 b ＝0.97、切片 a=0.09 となっており、ほぼ鉄塔風速とドップラーライダ風速は同等であると言える。

風向別の相関係数は、大部分が同程度の状況を示しているが、北北東～北東で相関が高く、北西～北北西で相関がやや低くなっている。それでも、$R^2$=0.94 の相関があり、十分高い相関があるといえる。

風速頻度の比較を図 4.5 に示す。

参考）　日本気象協会が平成 5 年 3 月に AR-410 型ドップラーソーダを性能評価した実績（評価地点：つくば気象研究所露場、期間：平成 3 年 12 月～平成 4 年 3 月で 48 日間実施）では、鉄塔風向との一致率（風向差±1 方位以内）88%以上、鉄塔風速（全風向）の相関係数 R=0.89 以上であった。

表 4.3　ドップラーライダと気象観測鉄塔との風向相関表

| | | ドップラーライダ風向 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | NNW | N | Calm | 全風向 |
| 気象観測鉄塔風向 | NNE | 5425 | 184 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 150 | 2 | 5772 |
| | (%) | 94.0 | 3.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.6 | 0.0 | 100.0 |
| | NE | 633 | 7407 | 371 | 5 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 8423 |
| | (%) | 7.5 | 87.9 | 4.4 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| | ENE | 2 | 178 | 2490 | 184 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2860 |
| | (%) | 0.1 | 6.2 | 87.1 | 6.4 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 100.0 |
| | E | 0 | 6 | 79 | 740 | 223 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1056 |
| | (%) | 0.0 | 0.6 | 7.5 | 70.1 | 21.1 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 100.0 |
| | ESE | 0 | 1 | 9 | 28 | 800 | 509 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1350 |
| | (%) | 0.0 | 0.1 | 0.7 | 2.1 | 59.3 | 37.7 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| | SE | 0 | 0 | 2 | 5 | 23 | 1327 | 748 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2111 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 1.1 | 62.9 | 35.4 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| | SSE | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 41 | 2591 | 355 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2995 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.4 | 86.5 | 11.9 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| | S | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 33 | 1808 | 421 | 6 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2274 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 1.5 | 79.5 | 18.5 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 100.0 |
| | SSW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 43 | 1700 | 690 | 12 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2453 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 1.8 | 69.3 | 28.1 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| | SW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 52 | 1338 | 532 | 13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1940 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 2.7 | 69.0 | 27.4 | 0.7 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 100.0 |
| | WSW | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 147 | 1077 | 478 | 9 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1718 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 8.6 | 62.7 | 27.8 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 100.0 |
| | W | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 7 | 203 | 1570 | 663 | 10 | 2 | 0 | 2 | 2459 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 8.3 | 63.8 | 27.0 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 100.0 |
| | WNW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 277 | 2604 | 766 | 5 | 0 | 1 | 3658 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 7.6 | 71.2 | 20.9 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| | NW | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 299 | 5176 | 680 | 6 | 0 | 6166 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.8 | 83.9 | 11.0 | 0.1 | 0.0 | 100.0 |
| | NNW | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 207 | 3297 | 193 | 0 | 3704 |
| | (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 5.6 | 89.0 | 5.2 | 0.0 | 100.0 |
| | N | 158 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 5 | 146 | 1745 | 0 | 2061 |
| | (%) | 7.7 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 7.1 | 84.7 | 0.0 | 100.0 |
| | Calm | 6 | 7 | 9 | 5 | 3 | 4 | 5 | 2 | 6 | 6 | 9 | 9 | 6 | 7 | 10 | 7 | 91 | 192 |

表 4.4　ドップラーライダと気象観測鉄塔との風速相関表

| 項目 / 風向 | データ数 | 相関係数 | 回帰係数 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | a | b |
| NNE | 5,770 | 0.98 | -0.02 | 0.98 |
| NE | 8,420 | 0.98 | -0.17 | 0.98 |
| ENE | 2,860 | 0.99 | 0.09 | 0.93 |
| E | 1,056 | 0.97 | 0.27 | 0.92 |
| ESE | 1,346 | 0.98 | 0.04 | 1.05 |
| SE | 2,107 | 0.96 | 0.01 | 1.04 |
| SSE | 2,992 | 0.96 | 0.17 | 0.97 |
| S | 2,261 | 0.99 | -0.09 | 0.98 |
| SSW | 2,446 | 0.99 | -0.15 | 1.01 |
| SW | 1,940 | 0.98 | -0.08 | 1.00 |
| WSW | 1,718 | 0.98 | -0.01 | 1.00 |
| W | 2,459 | 0.97 | 0.01 | 1.01 |
| WNW | 3,658 | 0.97 | 0.05 | 0.98 |
| NW | 6,166 | 0.94 | 0.10 | 0.98 |
| NNW | 3,704 | 0.94 | 0.19 | 0.99 |
| N | 2,061 | 0.95 | -0.16 | 1.08 |
| 全風向 | 50,964 | 0.98 | 0.09 | 0.97 |

備考:・回帰係数　y=a+bx(x:鉄塔、y:ライダ)

・風向の基準は鉄塔

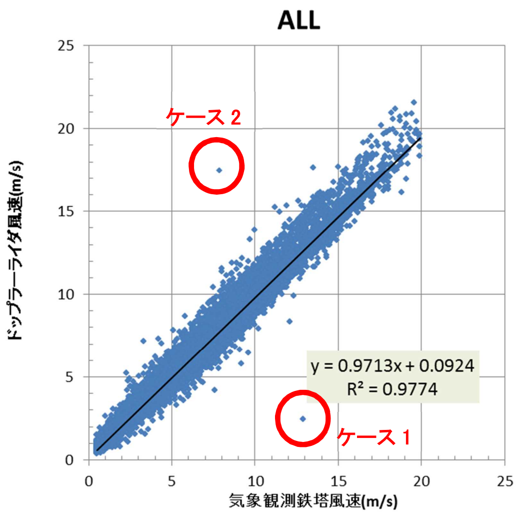



図 4.2　ドップラーライダと気象観測鉄塔の風速相関図（全方位）

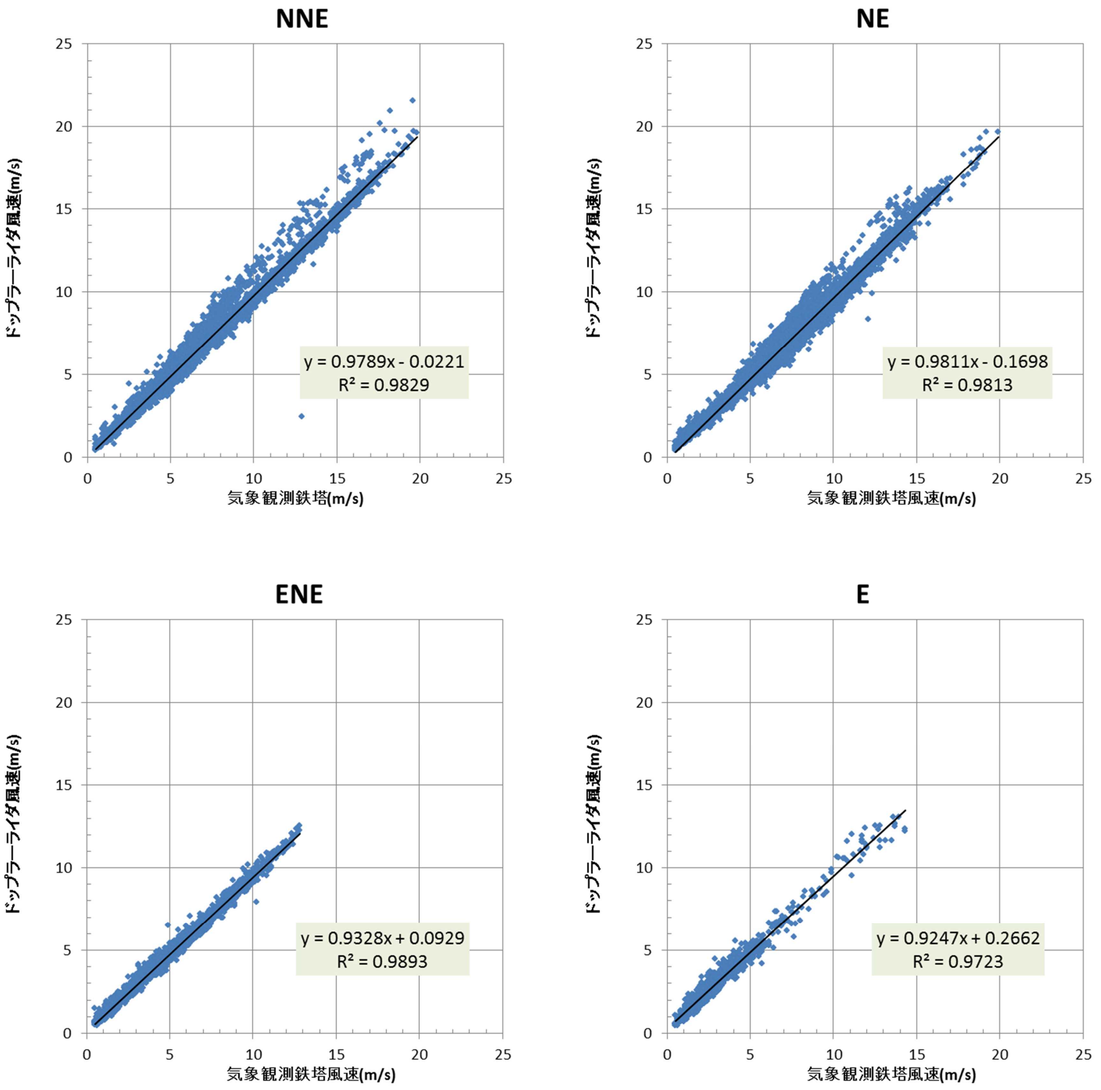



図 4.3　ドップラーライダと気象観測鉄塔の風速相関図（方位別）(1/3)

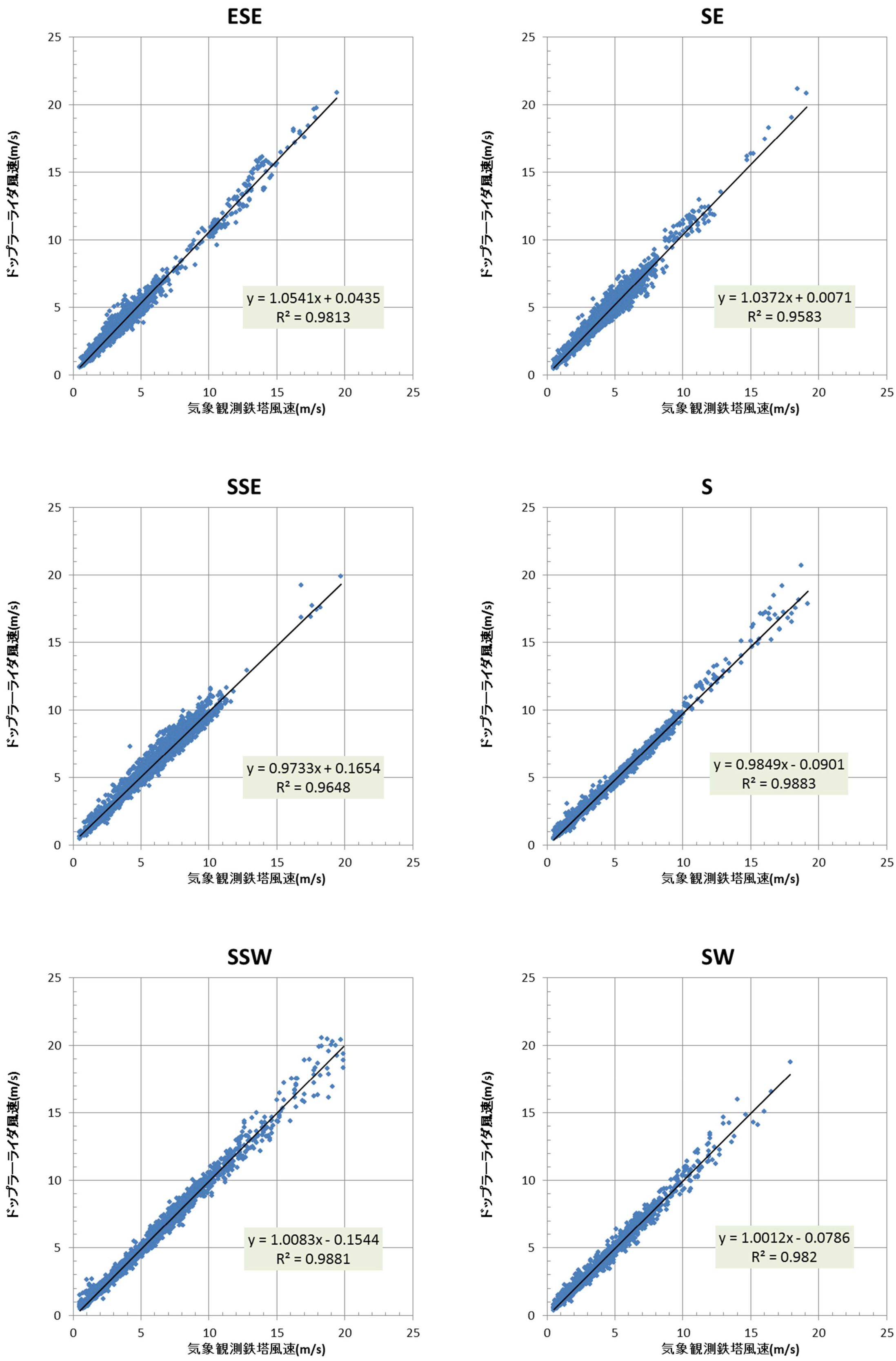



図 4.3　ドップラーライダと気象観測鉄塔の風速相関図（方位別）(2/3)

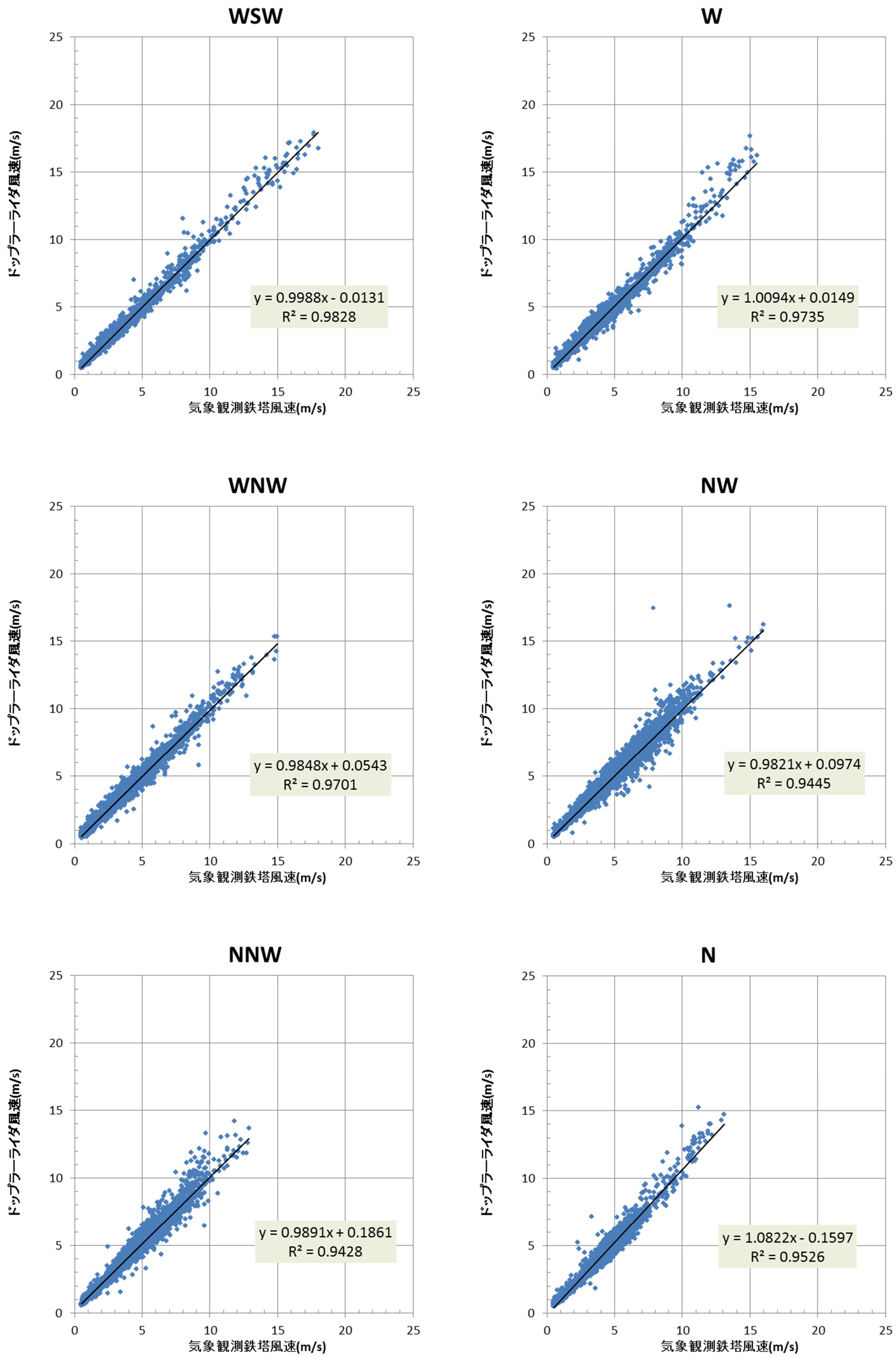



図 4.3　ドップラーライダと気象観測鉄塔の風速相関図（方位別）(3/3)

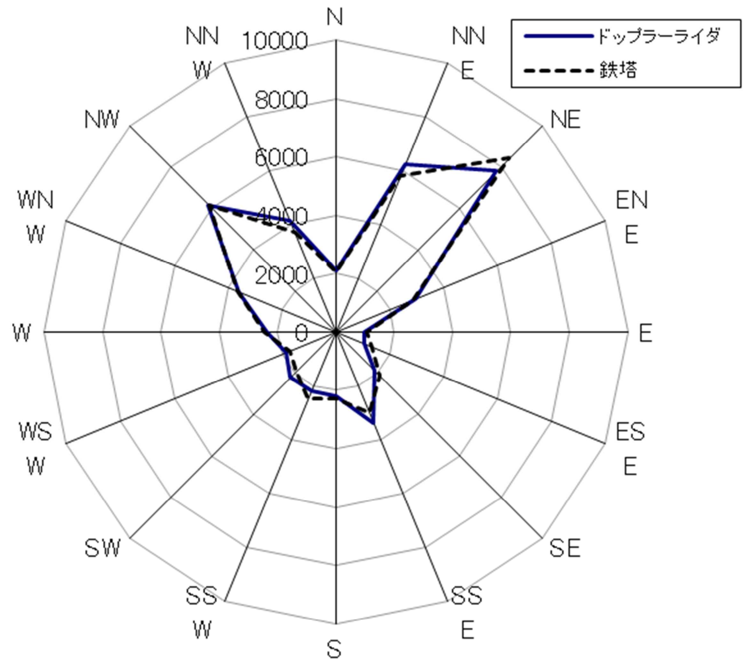



図 4.4　風配図

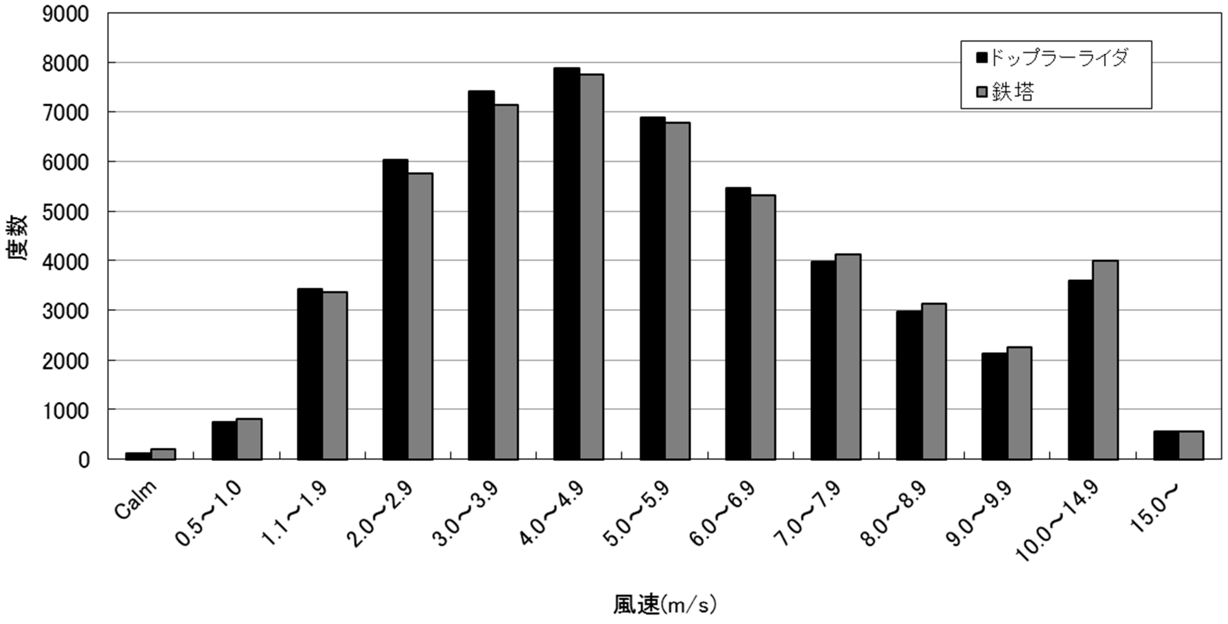



図 4.5　風速頻度の比較
（全データ平均値は気象観測鉄塔 5.58 m/s、ドップラーライダ 5.52 m/s）

4.4　観測値の差の出現状況

鉄塔とドップラーライダの風速差が 5 m/s 以上の場合の状況は、風速データ 50,964 件中で 3 件あった。

1 件目は、平成 24 年 6 月 19 日 23 時 50 分に鉄塔が 20 m/s 超、ドップラーライダが 26.3 m/s であり、風速差は 6.3 m/s である。本データは微風向風速計が振り切れているため、観測値の差とは言えない。

2 件目（図 4.2 でのケース 1）は、平成 24 年 9 月 2 日 5 時 30 分に鉄塔が 12.9 m/s、ドップラーライダが 2.5 m/s であり、風速差は－10.4 m/s である。この際には 5 時 34 分に本来分割されるべきではないファイルが分割されていることから、ドップラーライダの動作電圧が不安定になった可能性がある。しかしながら、電気担当部署が把握する限りではそのような瞬時電圧低下の情報は記録されていなかった。

3 件目（図 4.2 でのケース 2）は、平成 25 年 1 月 4 日 15 時 20 分に鉄塔が 7.9 m/s、ドップラーライダが 17.5 m/s であり、風速差は 9.6 m/s である。この時間帯の前後は絶対湿度の低下及び北西風によるエアロゾル濃度の減少（5.3 節参照）のため大量欠測が発生していた。

鉄塔とドップラーライダの風速差が 5 m/s 未満の場合の状況を表 4.5 に示す。風速差の絶対値が 1 m/s 未満の場合は全体の 96.3%、風速差の絶対値が 2 m/s 未満の場合は全体の 99.7%と、全体的には良好な一致を示した。

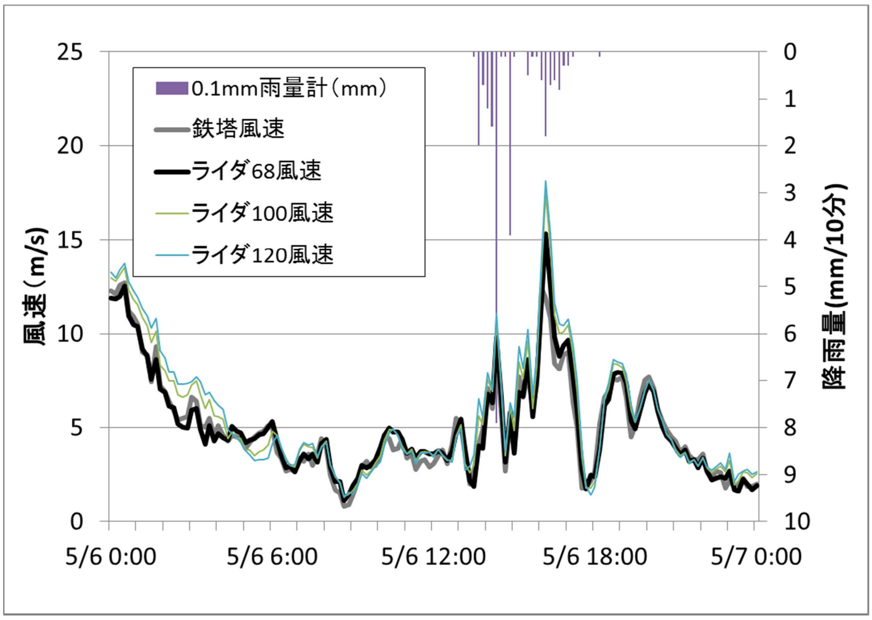
表 4.5 鉄塔とドップラーライダの風速差の絶対値が 5 m/s 未満の場合の状況

| 風速差 X（m/s）<br>＝ドップラーライダー鉄塔 | 例数 | 割合(%) |
|---|---|---|
| －5＜X≦－4 | 0 | 0 |
| －4＜X≦－3 | 4 | 0.01 |
| －3＜X≦－2 | 15 | 0.03 |
| －2＜X≦－1 | 578 | 1.1 |
| －1＜X≦0 | 31,445 | 61.4 |
| 0＜X＜1 | 17,868 | 34.9 |
| 1≦X＜2 | 1,163 | 2.3 |
| 2≦X＜3 | 92 | 0.2 |
| 3≦X＜4 | 16 | 0.03 |
| 4≦X＜5 | 8 | 0.02 |
| 合計 | 51,189 | |

## 4.5　荒天時の観測状況

### a. ひょう

水戸地方気象台発行「茨城県の気象・地震概況」によると、平成 24 年 5 月 6 日には上空に強い寒気が入り、茨城県内では竜巻による人的・家屋・農作物被害が発生した。観測値である東海村においては、そのような被害は多くはなかったものの、直径 2～3 cm の「ひょう」を観測した。降雹時の測定例を図 4.6 に示す。急激な風向変化、風速変化に追随できているとともに、地上高 120m までの範囲においては欠測も生じていない。ドップラーライダの測定はレーザを使用しているため、「ひょう」が落下した際に発する音に限らず、いかなる音にも妨害されない特性である。



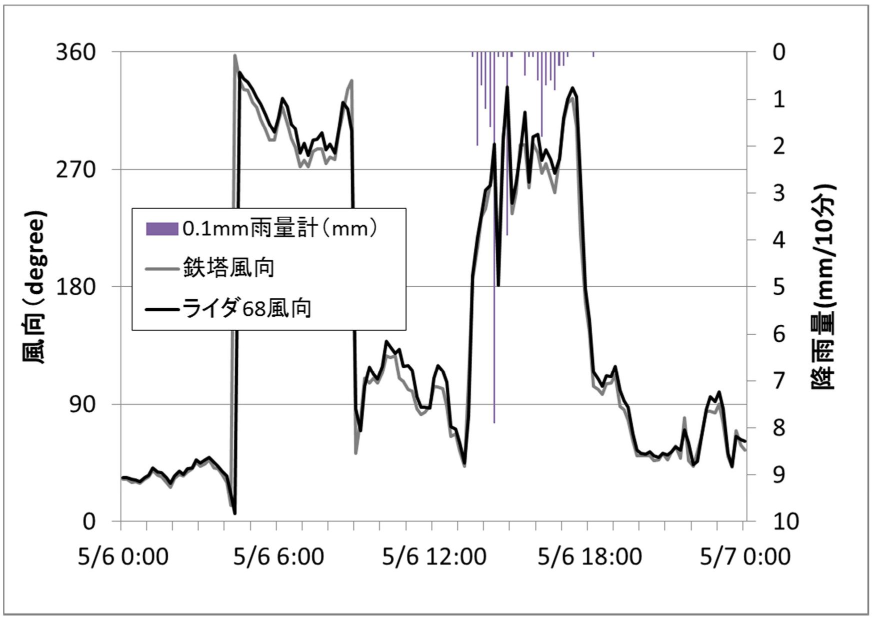
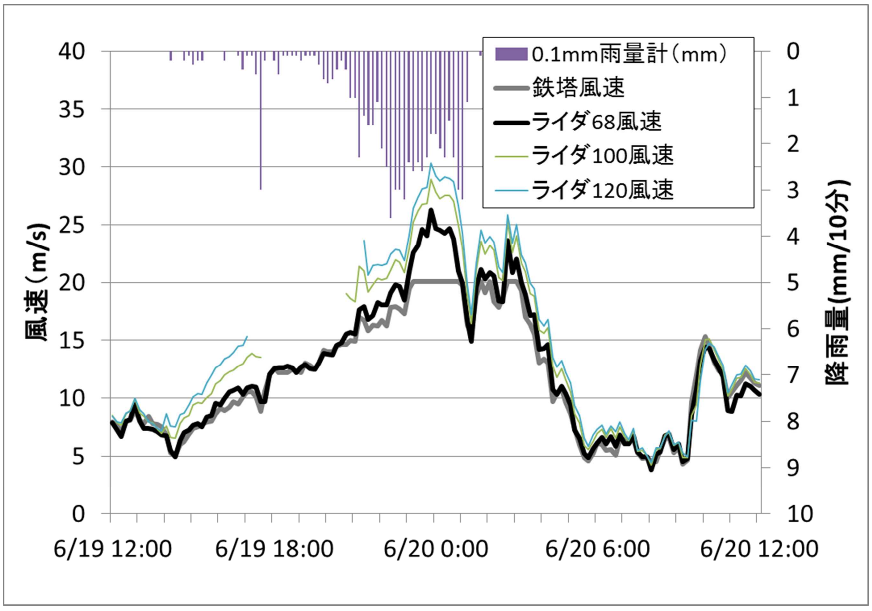




図 4.6　平成 24 年 5 月 6 日の風速及び風向の比較図

ｂ．強風及び大雨

「茨城県の気象・地震概況」によると、平成 24 年 6 月 19 日から 20 日にかけ、台風第 4 号が県北部を通過し風雨共に強くなった。大雨警報は 19 日 17 時 05 分から 20 日 2 時 14 分まで、暴風警報は 19 日 22 時 15 分から 20 日 6 時 10 分まで発表された。サイクル工学研究所構内雨量計の 1 時間雨量は最大で 17.7 mm（19 日 23 時）であった。強風及び大雨時の測定例を図 4.7 に示す。風車型微風向風速計（黒線）が最大測定風速 20 m/s で振り切れている時間帯において、地上高 68m では 25 m/s、地上高 120m では 30 m/s の風速が観測できている。



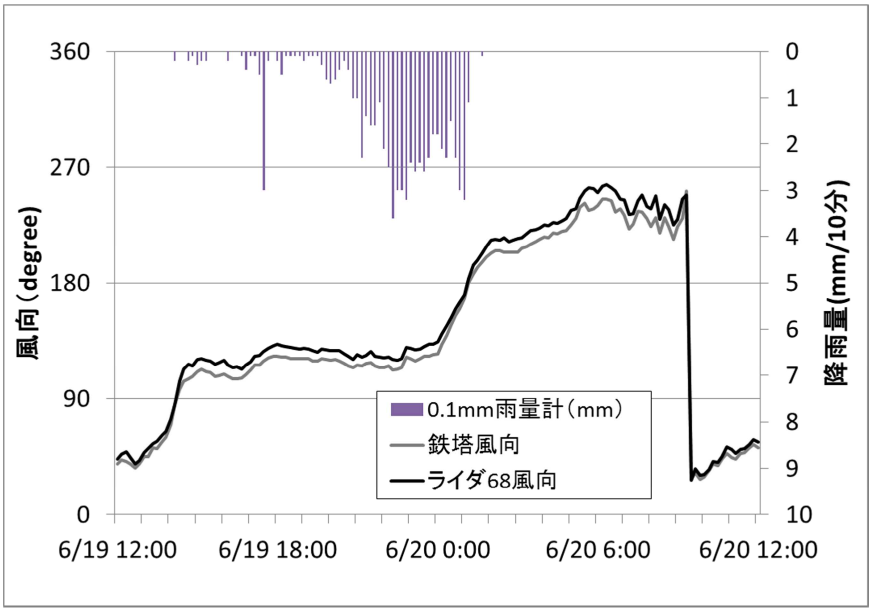
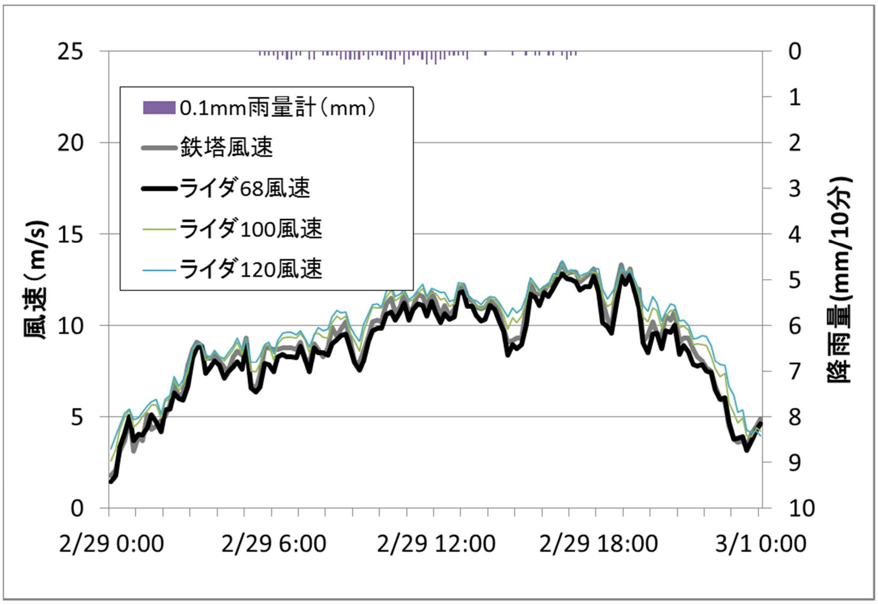




図 4.7　平成 24 年 6 月 19 日～20 日の風速及び風向の比較図

c．降雪

「茨城県の気象・地震概況」によると、平成 24 年 2 月 29 日には、低気圧が関東南海上に発生したため、茨城県内は雪後時々雨になり、水戸地方気象台で 5 cm の積雪を観測した。本測定期間内においては、この積雪量が水戸地方気象台の最大積雪量であった。ドップラーライダにはヒータ及びワイパが内蔵されており、レーザを観測する窓は、継続的に自動除雪されている。降雪時の測定例を図 4.8 に示す。降雪時においても、ドップラーライダは問題なく測定できている。



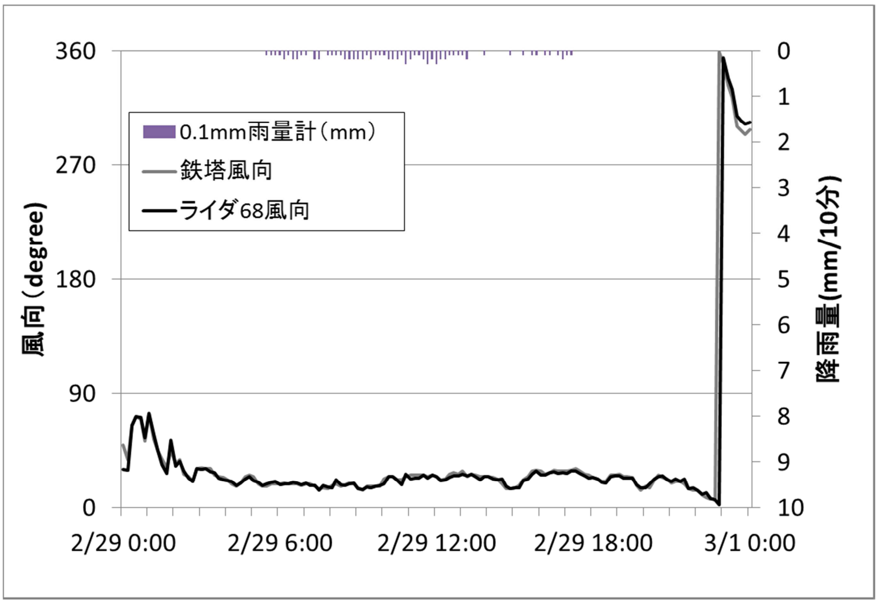




図 4.8　平成 24 年 2 月 29 日の風速及び風向の比較図

# ５．考察

地上高 68m では 1 年間に 1,005 回の気象状況による欠測が生じた。本章では、欠測がなぜ発生したかについて、3.2 章「その他関連取得データ」を加味しながら考察する。なお、ドップラーライダ本体の警告ログの内容や、内部回路の自己診断テストの実施結果から、機器に関する不具合は特にないことを確認している。

## 5.1　降雨との関係

降雨時には、レーザ照射光が乱反射されるために、測定には不利な方向に働くと考えられたが、実際に欠測したのは、平成 24 年 3 月 6 日 8 時 10 分の 1 回のみである。その時の 10 分間降雨量は 0.2mm であり、決して強い雨ではなかった。よって、降雨との関連性はないと考えられる。

## 5.2　濃霧との関係

ドップラーライダはレーザ照射光の周波数変化で風速を観測しているため、一般的に濃霧時のような光が通らないような状況においては、欠測しやすいとされている。濃霧の状況は、連続観測できないため、水戸地方気象台発行の「茨城県の気象地震概況」により、東海村の注意報・警報発表状況を整理し、欠測との関連性を調査した。

a.　濃霧注意報の発表状況

濃霧注意報は分単位で発表されているが、ドップラーライダの測定値は 10 分値である。そのため、ドップラーライダの測定時間内の 10 分間のうち 6 分以上濃霧注意報が出されている時間帯において、濃霧注意報が出ているとして取り扱った。10 分間のうち 5 分以下である場合においては、濃霧注意報は出されていないものとして取り扱った。

図 5.1 に濃霧注意報発表状況を示す。平成 24 年 2 月から平成 25 年 1 月の 1 年間で 92,820 分（上記方法による換算時間）発表されており、全体の約 18%の時間に濃霧注意報が発表されている。特に 7 月は約 64%の時間に濃霧注意報が発表されている。

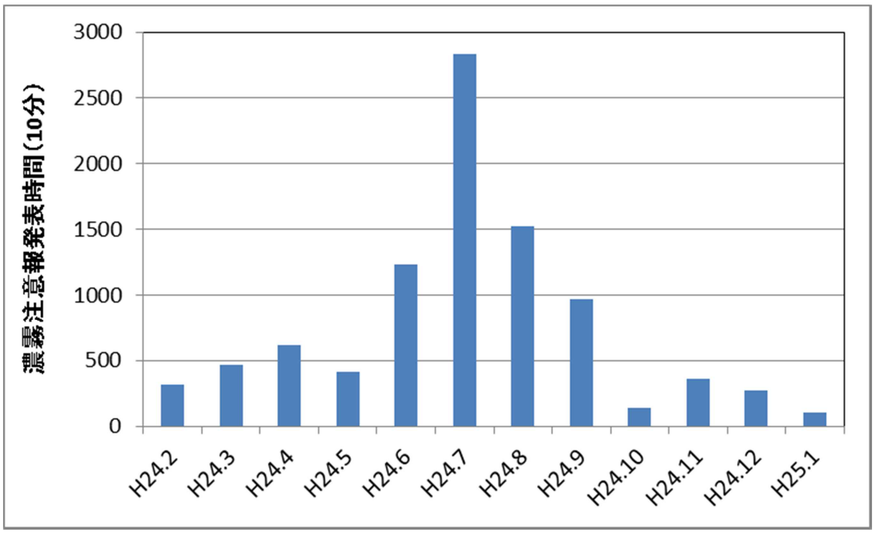



図 5.1　濃霧注意報発表状況（換算時間）

b.　濃霧注意報時の欠測率

地上高 68m 及び 140m における欠測率を図 5.2 に示す。地上高 68m での欠測数の多い冬季（11, 12, 1 月）においては、濃霧欠測率の方が全体欠測率よりも低い結果であった。これは、濃霧注意報が出ている方が、測定には有利に働くことを意味すると考えられる。

一方、地上高 140m では、夏季を中心とした欠測時は、濃霧注意報が出ているときに顕著に欠測率が高いことから、濃霧が欠測率を大きくさせていることと言える。しかし、冬季においては 68m 同様に全体欠測率の方が高いため、濃霧が原因とは考えにくい。

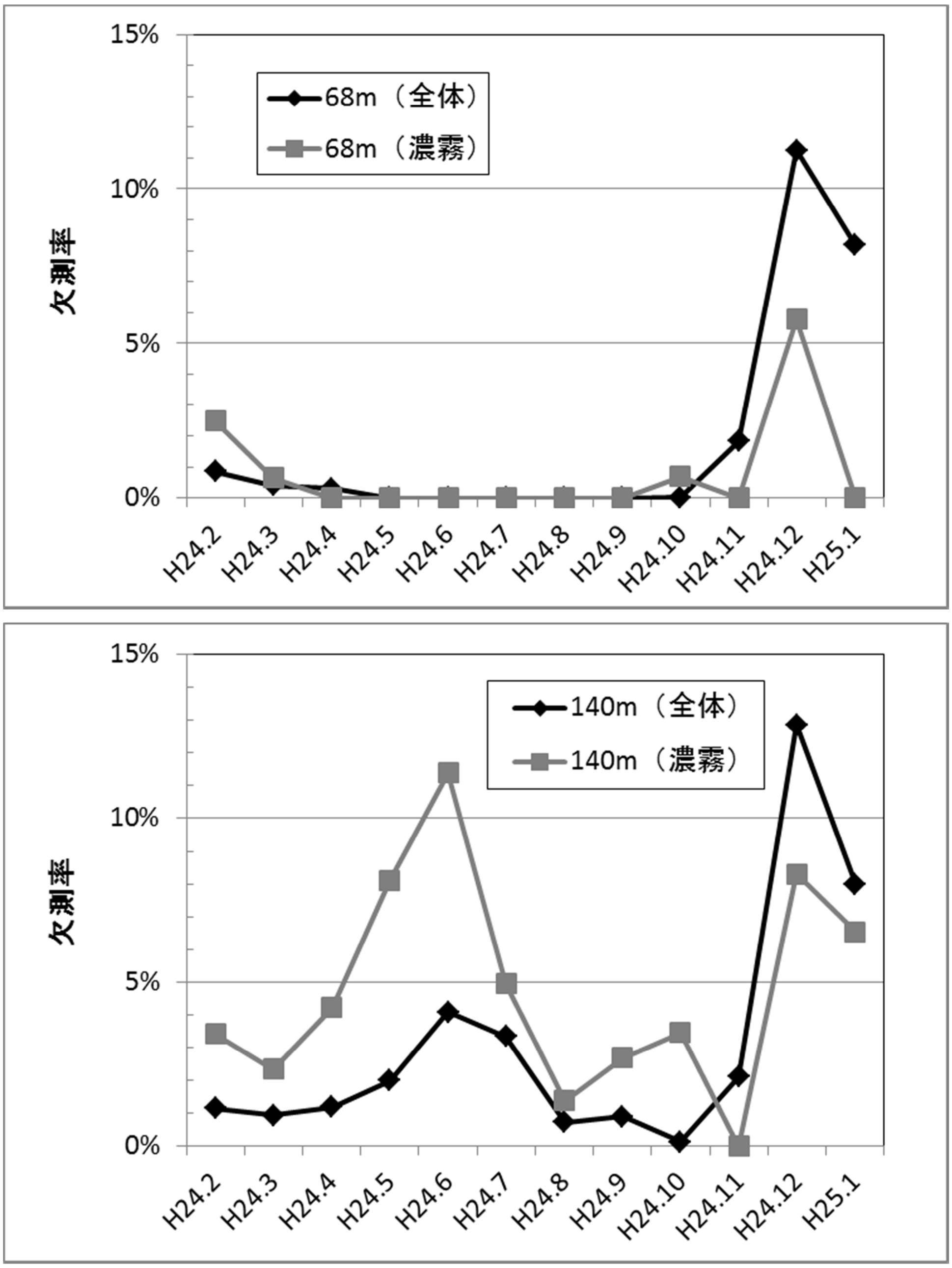



図 5.2　全体欠測率と濃霧欠測率（上：地上高 68m、下：地上高 140m）

5.3　エアロゾルとの関係

欠測の発生原因の一つとして考えられるのが、レーザ照射光を反射するために必要な大気中エアロゾルが当該地上高に十分存在していないことが考えられる。エアロゾル測定器での測定ができなかったため、サイクル工学研究所での地上 1.5m における気象観測結果を活用してエアロゾルとの関係を考察した。

大気温度(t(度))と飽和水蒸気量(e(g/m$^3$))の関係式（Tetens の式）

$$e = 6.11 \times 10^{\left[\frac{7.5t}{t+237.3}\right]} \quad (1)$$

飽和水蒸気量(e(g/m$^3$))と大気温度(t)と相対湿度(rh(%))から、水蒸気量(a(g/m$^3$))＝絶対湿度を求める式

$$a = \frac{217e}{(t+273.15)} \times \frac{rh}{100} \quad (2)$$

冬季の欠測が顕著になった平成 24 年 11 月 10 日から平成 25 年 2 月 1 日までの期間中、測定時及び欠測時における 4 つのパラメータ（風向、風速、放射収支量、絶対湿度）を散布図にプロットし、欠測時に特有なパラメータは何かを調査した。

最も欠測時パラメータが測定時とは異なる分布を示したのは、「風向」と「絶対湿度」であり、風向は 270～360 度（西風～北風）、絶対湿度は 6 g/m$^3$ 以下の場合に欠測となる可能性が高いことがわかった（図 5.3）。風速、放射収支量については、欠測時に特有な分布はなかった（図 5.4 及び図 5.5）。

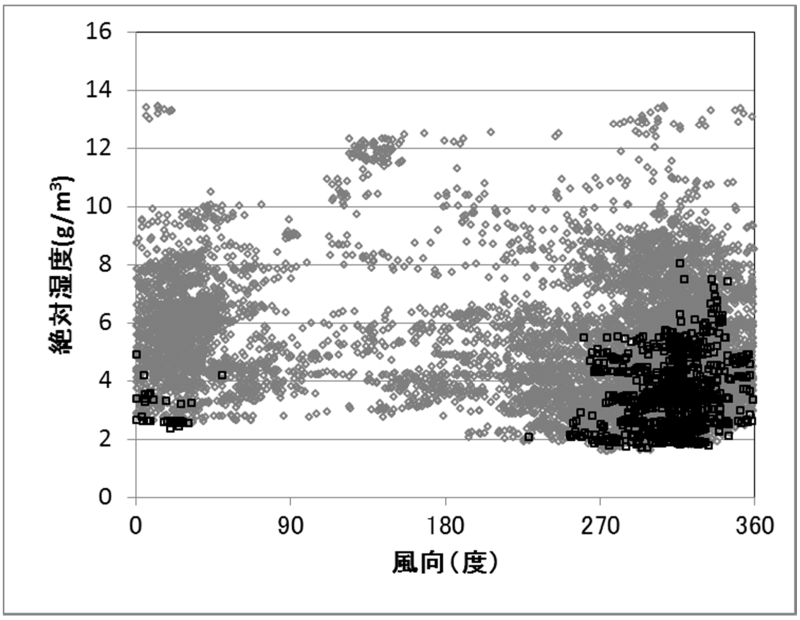



図 5.3　測定時における風向と絶対湿度の分布（灰：測定可、黒：欠測）

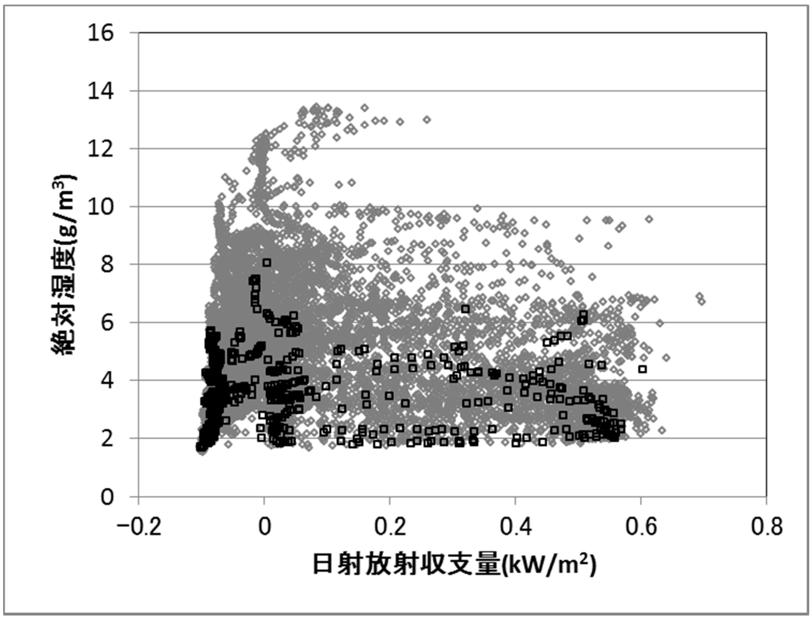



図 5.4　測定時における日射放射収支量と絶対湿度の分布（灰：測定可、黒：欠測）

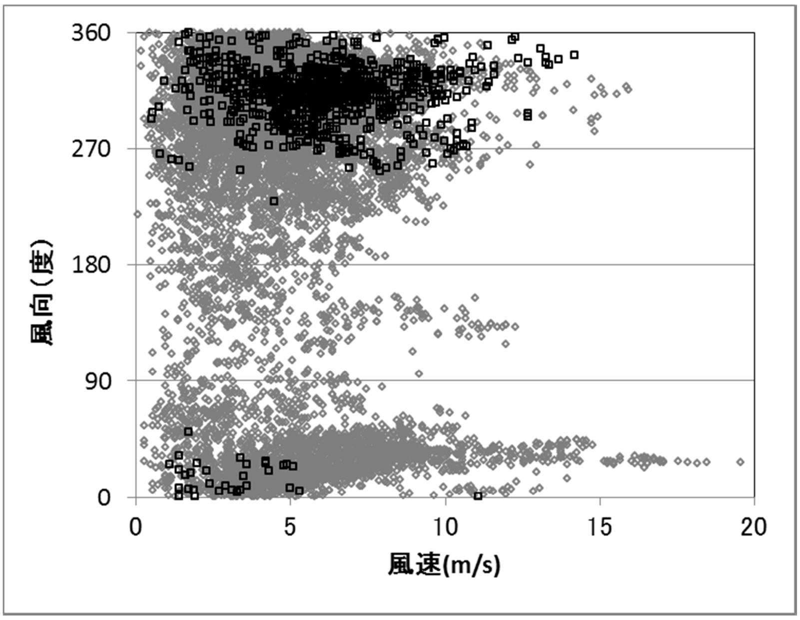



図 5.5　測定時における風速と風向の分布（灰：測定可、黒：欠測）

東海村の立地上、風向が北西方向の場合、空気は山岳地帯起源となることから、比較的清浄であり、エアロゾルは少ないと考えられる（東風の場合、海風となるためエアロゾルは存在、南風の場合、市街地からの風となるためエアロゾルは存在)。

また、温度湿度ともに低く絶対湿度（大気中水蒸気量）が低い場合においても、エアロゾル濃度は低いものと考えられる。

以上から、風向が北西方向であり、かつ絶対湿度が低い場合に欠測事例が集中しているものと考えられる。

5.4　その他注警報時の欠測率

図 5.6 に地上高 68m 及び 140m における全体欠測率と大雨(大雪含む)、雷、強風欠測率を示す。平成 24 年 2 月から平成 25 年 1 月の 1 年間で、それぞれの注意報または警報は、32,470 分、82,620 分、90,560 分発表されており（換算時間)、地上高 68m においては、全体欠測率よりも大雨（大雪含む)、雷、強風注意報が発表されている時間帯の欠測率の方が低かった。

一方、地上高 140m においては、夏季においては注意報発表時に欠測率が上昇している。冬季は逆に減少している。夏季は、エアロゾルが十分あるために、荒天時は見通しが悪くなるために欠測が増え、冬季のエアロゾルが不足しているときには、荒天がエアロゾルを補充する役目をするからかもしれない。

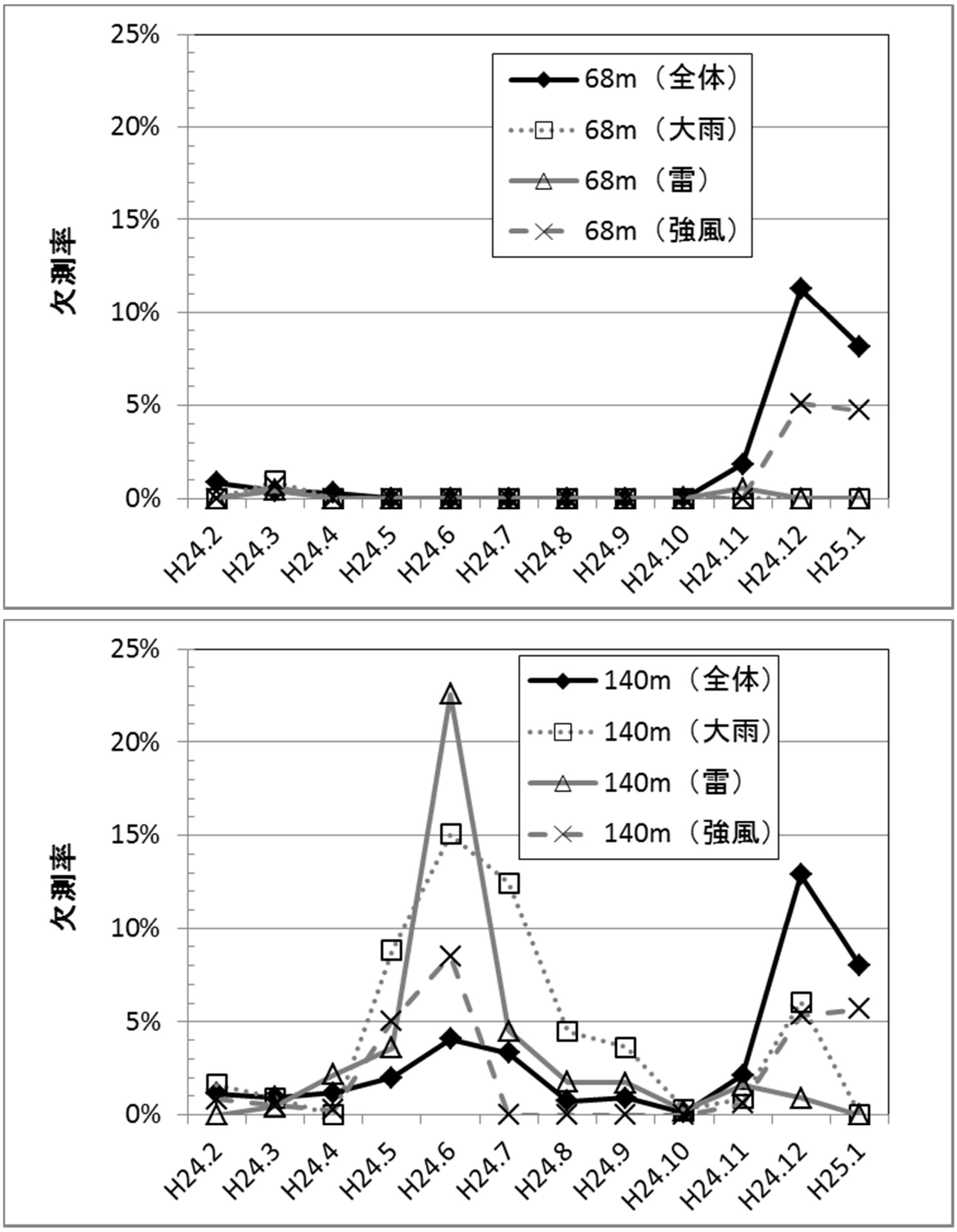



図 5.6　全体欠測率と大雨、雷、強風欠測率（上：地上高 68m、下：地上高 140m）

# ６．結言

平成 24 年 2 月 1 日から 1 年間のドップラーライダによる観測を実施し、鉄塔に設置した風車型風向風速計との比較等により得られた知見を以下に示す。

欠測率

- 茨城県東海村というサイト特有の状況（冬季の低絶対湿度、北西に山岳地帯有）も関係してくるが、年間欠測率は 1.7%（地上高 100m）から 10.7%（地上高 200m）の間となり、地上高 40～180ｍの間は気象指針の年間欠測率（10%以内）の範囲にあった。また、夏季よりも冬季に多く欠測が生じる傾向が見られるが、月間欠測率は 0～30%以下の範囲であった。
- 気象指針によれば、連続 30 日欠測率は、最大で 30%以下であるとしているが、地上高 40～180ｍの間でこの基準を満たしていた。

風向・風速の相関（地上高 68m）

- 風向の一致率（風向差±1 方位以内）は、各方位において 98.7～99.9%、全体で 99.6%にあり、高い一致率を示した。
- 風速の相関係数は、全風向では $R^2$＝0.98 となっており、高い相関となっている。回帰式においては勾配ｂ＝0.97、切片 a=0.09 となっており、鉄塔風速とドップラーライダ風速はほぼ同等であると言える。
- 風速差が 5 m/s 以上になった 3 件を調査すると、微風向風速計のオーバーフロー（20 m/s 超）、電圧不安定、欠測ぎりぎりの状況、での測定状況であった。風速差が 1 m/s 未満の場合は全体の 96.3%、2 m/s 未満の場合は全体の 99.7%が含まれ、全体的には良好な一致を示した。

欠測原因

- 降雨に起因する欠測は特に観測されなかった。夏季の比較的高高度では濃霧、冬季は北西風及び絶対湿度低下によるエアロゾルの不足が欠測原因となっている可能性が高い。この原因は設置場所特有の気象条件によるものであるため、設置地点の状況によって大きく左右されるものと考えられる。

以上より、地上高 180ｍ以下においては、気象指針で要求される欠測性能を満たすとともに、地上高 68m における比較測定結果における風向・風速の相関も良好であることから、本試験で使用したドップラーライダ（Leosphere 社製 Windcube WLS7）は、原子力施設からの一般公衆の線量評価を目的にした気象観測装置として、実用性のある装置であると考えられる。

# 付録 1：ドップラーライダ設置方法の詳細

RETF 工事監理棟屋上に設置したドップラーライダのデータは、ドップラーライダ内蔵 PC に取り込まれる。ドップラーライダ内蔵 PC と室内設置 PC を LAN ケーブルで接続し、リモートアクセスによって、パラメータの設定や測定の制御を行うとともに、取得データを収集した。また、ドップラーライダに電源を供給するため、変圧器及び給電装置を室内に設置した（図 A1)。RETF 工事監理棟は空調を常時稼働させていないため、夏季においては小型扇風機で給電装置を冷却しながら使用した。

LAN ケーブル及びドップラーライダ電源供給用ケーブルは、建物外壁に穴をあけ、天井点検口を利用して通した（図 A2)。

図 A1　RETF 工事監理棟室内の状況

図 A2　LAN ケーブル及びドップラーライダ電源供給用ケーブルの配線

## 付録 2：設置方角確認作業の詳細

ドップラーライダは概ね北を向くように設置したが､厳密に正北に合わせることは困難である。そのため、計画停電中で測定が停止していて、日射があり、風がなく、影の長さも十分であった平成 24 年 11 月 9 日の南中時刻（11 時 22 分*）に三角定規及び分度器を用いて、正北からのずれを観測した（図 A3)。

その結果、90 度を指すべき影は 92 度を指しており、2 度のずれを確認した。そのため、データ解析時においては、測定角から 2 度を差し引いて使用した。

* 国立天文台国立天文台天文情報センター暦計算室 HP（http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/）から、茨城県水戸市の南中時刻を用いた。設置地点と水戸地方気象台の経度差は約 7.5 分（＝0.125 度)、時間にすると約 30 秒のため、補正は行わなかった。

図 A3　正北からのずれの確認作業

# 国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|---|---|---|
| | 名称 | 記号 |
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 基本単位 | |
|---|---|---|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | $m^2$ |
| 体積 | 立法メートル | $m^3$ |
| 速さ，速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | $m/s^2$ |
| 波数 | 毎メートル | $m^{-1}$ |
| 密度，質量密度 | キログラム毎立方メートル | $kg/m^3$ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | $kg/m^2$ |
| 比体積 | 立方メートル毎キログラム | $m^3/kg$ |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | $A/m^2$ |
| 磁界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量濃度 (a)，濃度 | モル毎立方メートル | $mol/m^3$ |
| 質量濃度 | キログラム毎立法メートル | $kg/m^3$ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | $cd/m^2$ |
| 屈折率 (b) | （数字の）1 | 1 |
| 比透磁率 (b) | （数字の）1 | 1 |

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI 組立単位 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン (b) | rad | 1 (b) | m/m |
| 立体角 | ステラジアン (b) | sr (c) | 1 (b) | $m^{2/}m^2$ |
| 周波数 | ヘルツ (d) | Hz | | $s^{-1}$ |
| 力 | ニュートン | N | | $m\ kg\ s^{-2}$ |
| 圧力，応力 | パスカル | Pa | $N/m^2$ | $m^{-1}\ kg\ s^{-2}$ |
| エネルギー，仕事，熱量 | ジュール | J | N m | $m^2\ kg\ s^{-2}$ |
| 仕事率，工率，放射束 | ワット | W | J/s | $m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 電荷，電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差（電圧），起電力 | ボルト | V | W/A | $m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$ |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A | $m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$ |
| コンダクタンス | ジーメンス | S | A/V | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$ |
| 磁束 | ウエーバ | Wb | Vs | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| 磁束密度 | テスラ | T | $Wb/m^2$ | $kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| セルシウス温度 | セルシウス度 (e) | ℃ | | K |
| 光束 | ルーメン | lm | cd sr (c) | cd |
| 照度 | ルクス | lx | $lm/m^2$ | $m^{-2}\ cd$ |
| 放射性核種の放射能 (f) | ベクレル (d) | Bq | | $s^{-1}$ |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ | グレイ | Gy | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト (g) | Sv | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 酸素活性 | カタール | kat | | $s^{-1}\ mol$ |

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|---|---|---|---|
| | 名称 | 記号 | SI 基本単位による表し方 |
| 粘度 | パスカル秒 | Pa s | $m^{-1}\ kg\ s^{-1}$ |
| 力のモーメント | ニュートンメートル | N m | $m^2\ kg\ s^{-2}$ |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | $kg\ s^{-2}$ |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | $m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$ |
| 角加速度 | ラジアン毎秒毎秒 | $rad/s^2$ | $m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$ |
| 熱流密度，放射照度 | ワット毎平方メートル | $W/m^2$ | $kg\ s^{-3}$ |
| 熱容量，エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$ |
| 比熱容量，比エントロピー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | $m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 熱伝導率 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | $m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$ |
| 体積エネルギー | ジュール毎立方メートル | $J/m^3$ | $m^{-1}\ kg\ s^{-2}$ |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | $m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ |
| 電荷密度 | クーロン毎立方メートル | $C/m^3$ | $m^{-3}\ sA$ |
| 表面電荷 | クーロン毎平方メートル | $C/m^2$ | $m^{-2}\ sA$ |
| 電束密度，電気変位 | クーロン毎平方メートル | $C/m^2$ | $m^{-2}\ sA$ |
| 誘電率 | ファラド毎メートル | F/m | $m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$ |
| 透磁率 | ヘンリー毎メートル | H/m | $m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| モルエネルギー | ジュール毎モル | J/mol | $m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$ |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$ |
| 照射線量（X線及びγ線） | クーロン毎キログラム | C/kg | $kg^{-1}\ sA$ |
| 吸収線量率 | グレイ毎秒 | Gy/s | $m^2\ s^{-3}$ |
| 放射強度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | $m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 放射輝度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | $W/(m^2\ sr)$ | $m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$ |
| 酵素活性濃度 | カタール毎立方メートル | $kat/m^3$ | $m^{-3}\ s^{-1}\ mol$ |

表５．SI 接頭語

| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{24}$ | ヨタ | Y | $10^{-1}$ | デシ | d |
| $10^{21}$ | ゼタ | Z | $10^{-2}$ | センチ | c |
| $10^{18}$ | エクサ | E | $10^{-3}$ | ミリ | m |
| $10^{15}$ | ペタ | P | $10^{-6}$ | マイクロ | µ |
| $10^{12}$ | テラ | T | $10^{-9}$ | ナノ | n |
| $10^{9}$ | ギガ | G | $10^{-12}$ | ピコ | p |
| $10^{6}$ | メガ | M | $10^{-15}$ | フェムト | f |
| $10^{3}$ | キロ | k | $10^{-18}$ | アト | a |
| $10^{2}$ | ヘクト | h | $10^{-21}$ | ゼプト | z |
| $10^{1}$ | デカ | da | $10^{-24}$ | ヨクト | y |

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI 単位による値 |
|---|---|---|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1h =60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ’ | 1’=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | ” | 1”=(1/60)’=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | $1ha=1hm^2=10^4m^2$ |
| リットル | L，l | $1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$ |
| トン | t | $1t=10^3$ kg |

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| 電子ボルト | eV | $1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$ |
| ダルトン | Da | $1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$ |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da |
| 天文単位 | ua | $1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$ |

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| バール | bar | $1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$ |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=$10^{-10}$m |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バーン | b | $1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$ |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。 |
| ベル | B | |
| デジベル | dB | |

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| エルグ | erg | $1\ erg=10^{-7}\ J$ |
| ダイン | dyn | $1\ dyn=10^{-5}N$ |
| ポアズ | P | $1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$ |
| ストークス | St | $1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$ |
| スチルブ | sb | $1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$ |
| フォト | ph | $1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$ |
| ガル | Gal | $1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$ |
| マクスウェル | Mx | $1\ Mx=1G\ cm^2=10^{-8}Wb$ |
| ガウス | G | $1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$ |
| エルステッド (c) | Oe | $1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$ |

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| キュリー | Ci | $1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$ |
| レントゲン | R | $1\ R=2.58\times10^{-4}C/kg$ |
| ラド | rad | $1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$ |
| レム | rem | $1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$ |
| ガンマ | γ | 1 γ =1 nT=10-9T |
| フェルミ | | 1フェルミ=1 fm=10-15m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg |
| トル | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリー | cal | 1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー） |
| ミクロン | µ | $1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$ |

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています